

基礎生産データに基づいた流動・低次生産モデルの開放性沿岸域への適用

Numerical Model based on in situ Primary Production Data in Disposed Coastal Area

足立久美子¹・中山哲巖²・藤井良昭³・佐野朝昭⁴

Kumiko ADACHI, Akiyoshi NAKAYAMA, Yoshiaki FUJII and Tomoaki SANÔ

Based on in situ primary production data in Kashima-nada, parameters in the photosynthesis formula of the ecosystem model were changed. As a result, a coefficient of determination (R2) between the measurements and the calculation value improved in 0.86 from 0.51. We calculated with a new parameter and considered a characteristic of the spatial and temporal variation of primary productivity around Kashima-nada. Repeatability of the seasonal variation of concentration of phytoplankton and nutrients improved especially on the sea surface. It is necessary to correct grazing by the zooplankton and boundary condition of nutrients to give calculation accuracy more.

1. はじめに

沿岸域における基礎生産機構を明らかにすることは、高次の生物生産性を評価するための基礎となるのみならず、生物生産に対して環境変動が及ぼす影響を評価する上で重要である。さらに、開放性の高い沿岸砂浜域では貝類やシラスなど低次栄養段階の生物が漁獲対象として重要な位置を占めており、これらの資源動態の評価にもつながる。このような観点から著者らは、生物生産機構と海洋環境との関係を明らかにするため、鹿島灘～九十九里沿岸域を対象として、現地調査と数値解析を実施してきた。両海域は外洋の影響を強く受ける開放性海域で、利根川河川水と外洋からの栄養塩供給により基礎生産が支えられ、良好な漁場が形成されている。

これまでに、流動・低次生産モデルの構築・改良を行い、中山ら (2005)、新井ら (2006, 2007) が報告した。計算結果は流動や水質の分布変動の傾向を概ね捉えているが、基礎生産量を過小に、栄養塩濃度を過大に見積もる等、再現精度上いくつかの問題を抱えている。足立ら (2009) は、鹿島灘沿岸域で得た擬現現場法による基礎生産量の実測値から、基礎生産量の季節変動と気象および水質との関係を整理し、基礎生産を制限する環境要因について考察した。本報告ではこれらの結果に基づき、数値モデルの光合成過程のパラメータ (以後、光合成パラメータ) を見直す等の改良を行った上で計算を再度実施し、当海域における低次生産の時空間変動特性について考察した。

2. 研究の方法

鹿島灘南部沿岸域において1995年7月～2002年7月まで、季節毎に水産工学研究所調査船たか丸により計29回実施した基礎生産調査の結果を使用して、低次生産モデルの光合成パラメータの見直しを行った。調査地点は図-1に示したSt.H1およびH4の2測点である。両測点は、茨城県神栖市須田の (独法) 港湾空港技術研究所波崎海洋研究施設 (HORS) の沖合ライン上に位置し、距岸および水深はSt.H1で1.1km・10m、St.H4で11km・40mである。基礎生産量の測定方法および結果の詳細は足立ら (2009) が報告したとおりである。

鹿島灘の流動・低次生産モデルにおいて、基礎生産量は、(1) 式により計算している。

$$GPP = V_{max} \times \min(N_{inhib}, P_{inhib}) \times \exp(kT) \times \frac{1}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{1}{I_{opt}}\right) \times Chl \quad \dots (1)$$

ここで、

$$N_{inhib} = \frac{NO_3}{NO_3 + K_{N,NO_3}} \exp(-\psi NH_4) + \frac{NH_4}{NH_4 + K_{N,NH_4}}$$

$$P_{inhib} = \frac{PO_4}{PO_4 + K_{N,PO_4}}$$

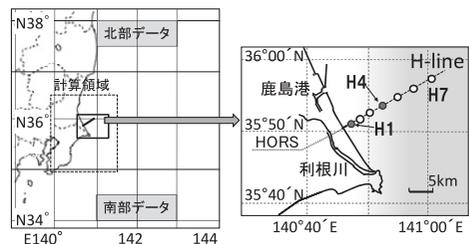


図-1 観測地点、数値計算の計算領域および栄養塩境界値の検討に使用したデータ領域

- | | | | |
|---|-----|-----|-------------------------------------|
| 1 | 正会員 | 水産修 | (独法) 水産総合研究センター水産工学研究所水産基盤グループ主任研究員 |
| 2 | 正会員 | 工修 | (独法) 水産総合研究センター水産工学研究所水産基盤グループ長 |
| 3 | | 地環修 | (財) 漁港漁場漁村技術研究所 |
| 4 | | | (財) 漁港漁場漁村技術研究所 |

表-1 低次生産モデルの光合成パラメータ設定

パラメータ		単位	文献値*	使用値
最適光強度	I_{opt}	cal/cm/min	0.07~0.15	0.07
NO ₃ 半飽和定数	KN _{NO₃}	μM/L	1.0~3.0	3.0
NH ₄ 半飽和定数	KN _{NH₄}	μM/L	0.1~3.0	3.0
NH ₄ 選択係数	ψ	1/μM	1.3~2.7	1.5
PO ₄ 半飽和定数	KN _{PO₄}	μM/L	0.1~	0.15
最大光合成速度	V_{max}	/day	0.2~1.0	1.0
光合成温度係数	k	/°C	0.063, 0.0693	0.063

*三陸沖 (Kishiら, 2001), 北東太平洋 (Kawamiyaら, 1995), 東京湾 (中田, 1993), 日本周辺黒潮域 (小松ら, 2004)

式中のGPPは基礎生産量, Tは水温, Iは光量子量, NO₃・NH₄・PO₄・Chlはそれぞれ硝酸塩・アンモニウム塩・リン酸塩・chl.a濃度を表す。その他の記号は表-1に示したとおり光合成パラメータであり, 見直し前においては表中右段の数値を用いている。(1)式に, 観測で得られた水温, 光量子量, 栄養塩濃度, chl.a濃度および表-1に示したパラメータ値を代入して算出した基礎生産量(GPP)と, 基礎生産量実測値との比較を行った。その後, 各パラメータを種々に変化させ, パラメータの最適値を求めた。そして基礎生産量の実測値と水温・光量・栄養塩濃度との関係から新たなパラメータの妥当性を検討した。

次に, 改良したパラメータを使用して, 鹿島灘・九十九里海域の流動・低次生産モデルにより2005年1年間の計算を行った。モデルの基本構成は, 流動場については, Princeton Ocean Model (POM: Blumbergら, 1987)を, 低次生態系はKawamiyaら(1995)のKKYSモデルをベースとし, 窒素以外にリンのコンパートメントを組み込んだものである(新井ら, 2007)。なお, 光合成項の改良に先んじて, 新井ら(2007)のモデル(以後, 前モデルと記載)をいくつか改良して用いている。

POMに黒潮・親潮続流の影響を取り込むために, JCOPEデータ(水平1/12°, 鉛直44層)を使用した。境界放射条件とし, 境界における流れ・水温・塩分はJCOPEデータを線形補間したものを計算領域の各境界メッシュ(流れは順圧成分のみ設定)に与えている。JCOPEデータには栄養塩データがないため, 境界から流入する栄養塩濃度については, JODC(日本海洋データセンター)のデータベースにより水温との関係を定式化し, 水温に依存させる形で用いた。前モデルにおいては関係式を一次式としていた。本モデルでは図-1に示した南北エリアのデータそれぞれについて水温依存式を作り計算領域の南北境界に適用するなど試行を繰り返したが, 最終的に東南北境界すべてに, 図-2に示した北部エリアの関係式により求めた栄養塩濃度を与えることとした。なお, 表層近傍については, 植物プランクトンの摂取により水温に係わらず栄養塩が少ない傾向にあること

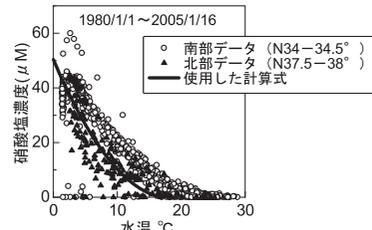


図-2 JODCデータによる水温と栄養塩の関係

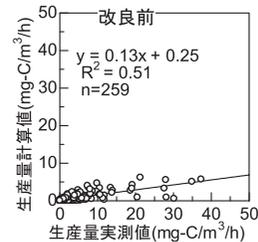


図-3 光合成項のパラメータ改良前における基礎生産量実測値と計算値との比較

から, 観測結果に基づいた値を与えた。計算領域は, 図-1中の点線で示した範囲で, 前モデルでは南北115km, 東西65kmであったが, 黒潮等の海流の影響をより精度よく再現するため, 本モデルでは南北175km, 東西150kmに拡大した。水平メッシュおよび鉛直格子について, 前モデルではそれぞれ500m, 9層としていたが, 本モデルではそれぞれ1,000m, 20層に変更した。計算対象の河川は, 利根川と那珂川の2河川とした。河川データ・気象データおよび光合成以外のモデルパラメータ等については, 新井ら(2006)が報告したとおりである。

以上の方法により数値計算を行い, 光合成パラメータの改良前後の計算結果を比較した。また, 図-1に示したSt.H7を代表点とし, 観測データとの比較検証を行った。さらに計算結果に基づき, 低次生産の時空間変動特性について考察した。

3. 結果と考察

(1) 基礎生産量実測値と計算値との比較

光合成パラメータは, 改良前時点では表-1に示した日本周辺海域での使用例を参考に値を定めている。

基礎生産量の実測は, St.H1とH4の2点で計29回実施したが, それぞれ水深方向に4~5層で測定しており, データ数は計259である。基礎生産調査においては, 光量子量・水温・chl.a・栄養塩濃度等を同時に計測しているので, これらをデータセットとした。(1)式において改良前のパラメータを使用し, 実測した光量子量・水温・chl.a・栄養塩濃度を代入して生産量を計算した。計算結果と生産量実測値との比較結果を図-3に示した。両者の間に正の相関($R^2=0.51$)はみられるものの, 計算値

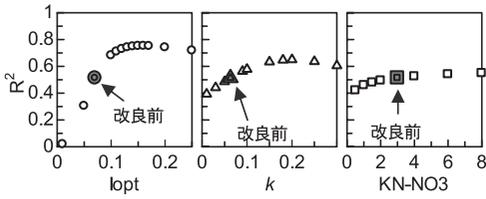


図-4 パラメータ1項目のみを変えた場合の計算値と観測値との相関 (lopt, k, KN-NO₃ 値の場合)

は実測値に比較して過小であることがわかった。

(2) 光合成過程パラメータの改良と妥当性の検討

最適光強度 lopt, 光合成の温度係数 k, 栄養塩の半飽和定数 KN_{Nuts} および NH₄ 選択係数 ψ について, 1項目のみの値を変化させたときの相関の変化を調べた。図-4は, lopt, k および硝酸塩の半飽和定数 KN-NO₃ を変化させた場合の相関 (決定係数: R²) の変化を示している。最も感度が高いのは lopt で, 値を 0.07 から 0.15 に変更すると, R²=0.78 に向上した。次いで k の感度が高く, 0.063 から 0.15 ~ 0.2 程度に変更すると R²=0.67 程度となった。KN-NO₃ および他のパラメータの感度は高くなく, lopt と k の数値を両者とも 0.15 前後に設定すれば R²=0.8 以上となり, 計算結果の過小傾向も解消された。

実際に計算値と実測値との相関が最も高かったパラメータの組み合わせを表-2右段に示した。栄養塩の半飽和定数はアンモニウム塩とリン酸塩の値が半減以下となった。改良後のパラメータを用いて計算した値と実測値の比較結果を図-5に示した。R²=0.86 となり, 良好な関係が得られた。

実測値をもとに基礎生産を制限する環境条件について考察した結果 (足立ら, 2009) から, 改良値の妥当性を検討した。DIN の濃度が 1 μM を, 海面光量が 35 mol/m²/day を下回ると生産量が非常に小さく, 栄養塩枯渇や光量不足が基礎生産を制限したと考えられた。両者のいずれかによる制限下のデータを除外した場合の水温と生産量の関係式は, 図-6 (a) のようになり, 温度係数は k=0.17 と算出された。このことから, k 値の 0.13 への変更は妥当と考えられた。また, 栄養塩の制限を受けない場合について, 海中光量と生産量との関係を図-6 (b) に示した。図から, 最適光強度 lopt の 0.15 への変更も妥当と判断された。栄養塩の半飽和定数も, 改良前の値の条件下では, 実測値において生産が制限されていなかったことから, 値を低減させることは問題ないと考えられた。

(3) 数値計算結果と観測データの比較および低次生産の時空間特性

2005年1年間の流動・低次生産モデルによる計算結果について, St.H7における各層採水によるデータとの比較を行った。このうち表層・水深20mおよび100mについて, 光合成パラメータ改良前後の水温・chl.aおよび硝

表-2 改良前後における光合成パラメータ設定

パラメータ		単位	改良前	改良後
最適光強度	lopt	cal/cm ² /min	0.07	0.15
NO ₃ 半飽和定数	KN-NO ₃	μ M/L	3.0	2.9
NH ₄ 半飽和定数	KN-NH ₄	μM/L	3.0	1.0
NH ₄ 選択係数	ψ	1/μM	1.5	1.2
PO ₄ 半飽和定数	KN-PO ₄	μM/L	0.15	0.065
最大光合成速度	Vmax	/day	1.0	0.87
光合成温度係数	k	/°C	0.063	0.13

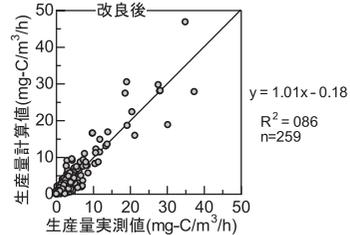


図-5 光合成項のパラメータ改良後における基礎生産実測値と計算値との比較

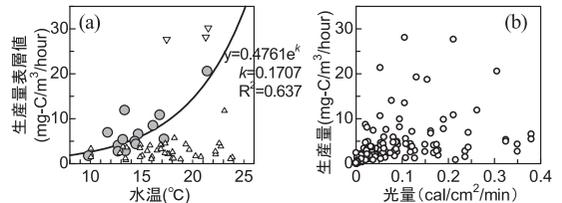


図-6 基礎生産実測値と環境要因との関係

- (a) 水温と生産量表層値 (●▽: 光量と栄養塩の制限を受けないケースで▽は河川増水時, △: 光量が栄養塩に制限されるケース)
- (b) 光量と生産量各層値 (栄養塩の制限がないケース)

酸塩の計算結果および観測値を図-7に示した。ただし2005年については利根川河口周辺のデータしか存在しないため, 1997~2002年および2007~2009年に行った観測結果を図示した。H-line付近における水質の季節変動については, 足立ら (2007, 2009) が報告したが, 要約すると以下のように推移する。水温は2~3月に最低水温, 9月に最高水温となり, 変動幅は5~26°C程度である。栄養塩は冬季に高濃度であるが春季ブルームを経て減少し, 夏季には河川出水による供給に依存するため河口部以外の表層では枯渇が生じ, その後秋以降に徐々に回復する。春季ブルームは2~3月に始まり, 約3ヶ月間持続するが, それ以外の季節では夏季の河川増水時を除き, chl.aは低濃度である。本モデルによる計算結果は, 各項目の季節変動特性をよく再現しているといえる。

一方, HORSにおいては2000年以降に観測機橋の汀線部と先端部表層から日毎に採水を行い, 水質分析を行っている。この結果 (図-8) から2005年の水質変動の特徴をみると, 2005年は例年に比べ2~5月および12月に冷水傾向が強く, これらの時期には栄養塩濃度は通常

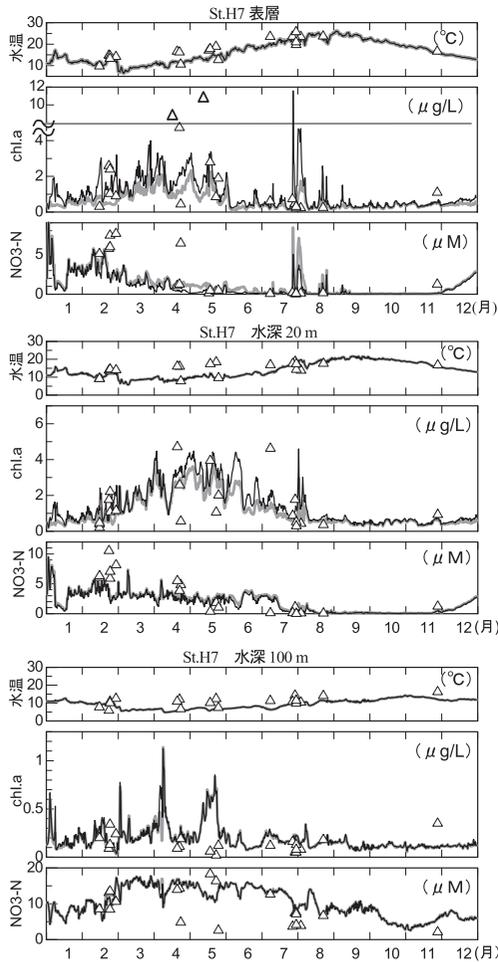


図-7 計算結果の例：2005年のSt.H7表層・水深20m・水深100mにおける水温・chl.a・硝酸塩変動
 —：改良前，—：改良後
 △：1997～2002，2007～2009年実測値

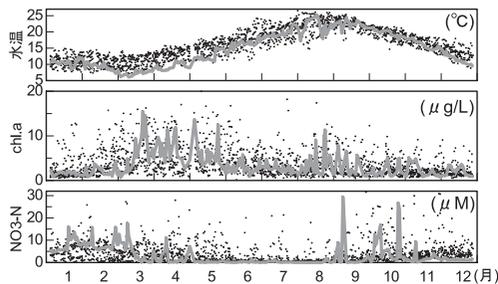


図-8 HORS 棧橋先端部における水温・chl.a・硝酸塩変動
 —：2005年，●：2001～2009年

より低かった。また，春季ブルームが2月後半から始まると急速に栄養塩は減少し，3～8月には陸源水が到達しない限り，枯渇状態であった。図-7の表層値をみまると，春季には水温・硝酸塩ともに観測値に比べると計算結果は低めに推移し，以上の結果に矛盾しなかった。

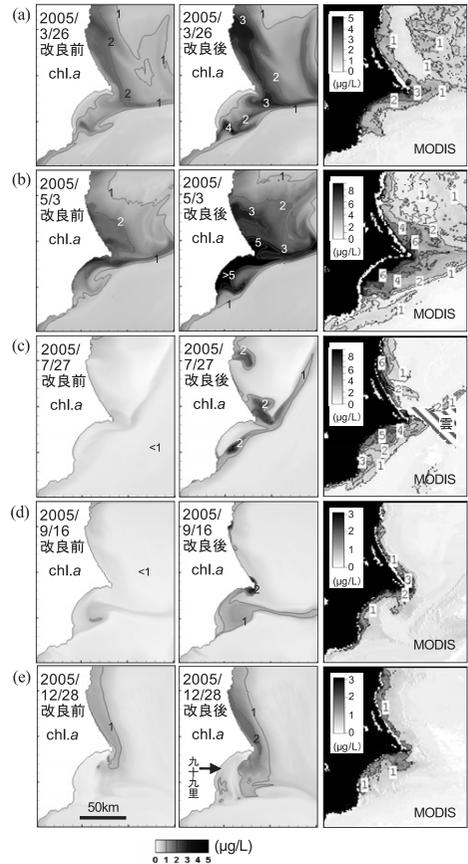


図-9 表層におけるchl.a分布計算結果とMODIS画像の例
 (a) 2005/3/26, (b) 5/3, (c) 7/27, (d) 9/16, (e) 12/28
 左段：改良前，中段：改良後，右段：MODIS画像

光合成パラメータ改良前後の計算結果を比較すると，chl.aは，改良後の計算値の方が表層では大きくなるが，無光層においてはほとんど変わらない結果となった。栄養塩は改良後の計算値の方が若干小さくなった。以上から，パラメータの改良により基礎生産量を過小に，栄養塩濃度を過大に見積っていた問題点は是正される方向に修正された。しかし少なくともSt.H7においては，期待したほどの改善とはいえない。

次に，計算結果の平面分布について検討を行った。広域の観測データがないため，表層の計算結果をMODIS画像のchl.a分布と比較した。図-9に，2005年の代表例として，3/26，5/3，7/28，9/16，12/28のMODIS画像とパラメータ改良前後の計算結果を示した。また，7/27の硝酸塩分布および流速分布を図-10に示した。chl.aの平面分布(図-9)をみると，改良前に比べ改良後の計算結果は分布パターンや濃度レベルがMODISデータとよく一致しており，植物プランクトン量の過小傾向がかなり解消されたことがわかる。また鹿島灘沖合に低chl.aの冷水が分布している様子(a)や，ごく沿岸で高chl.aとなっ

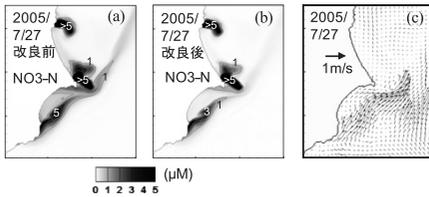


図-10 2005/7/28 の表層における硝酸塩濃度と流速分布の計算結果：(a)硝酸塩(改良前)，(b)硝酸塩(改良後)，(c)流速

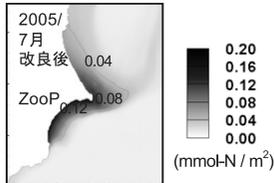


図-11 動物プランクトン分布計算結果 (7月平均値)

ている様子 (e)，利根川河口部および九十九里浜の南側海域に存在する地形性湧昇域で増殖した植物プランクトンが，黒潮の北上または東進に巻き込まれ筋状に伸びる様子 (a) (b) (c) 等がより明瞭となった。硝酸塩濃度の表層値 (図-10) も改良前に比べると低下し，夏季の栄養塩枯渇等の再現性は向上した。したがって計算領域全体でみると，特に表層部で光合成パラメータ改良による精度向上への効果が大きかったといえる。

図-9 (c) (e) や図-7のように，沿岸部に着目すると，観測値や衛星画像に比較して栄養塩とchl.aが低い傾向がしばしばみられ，chl.aの傾向については九十九里沿岸で顕著であった。図-11に7月における動物プランクトンの平均濃度算出値を示した。プランクトンネット曳網による計数結果からは，動物プランクトンの平均濃度は岸に近いほど高い傾向がみられ，計算結果も同様の傾向が示された。本モデルにおいて動物プランクトンの摂餌量は文献値を参考に決定して用いたが，沿岸でchl.aが低い傾向は摂餌量が過大であるために生じた可能性が考えられた。また栄養塩分布については，栄養塩濃度の境界条件の問題や，計算では海水の混合が強すぎるなどが原因として考えられた。今後，これらの問題について計算結果の詳細な解析やさらなるケーススタディおよび現地観測データの集積を経て検討し，是正する必要がある。

4. まとめ

鹿島灘における基礎生産量の実測値と流動・低次生産モデルの光合成式による計算結果を比較し，最も相関が高くなる光合成パラメータを決定した。これを使用して2005年1年間の計算を実施し，鹿島灘～九十九里海域における低次生産の時空間変動特性について考察した。

(1) 光合成パラメータについて，従来値による計算結果は実測値に比較して過小で相関 (決定係数) は $R^2=0.51$ で

あった。最適光強度と光合成の温度係数を従来値の約2倍に修正するなど，実測値から基礎生産を制限する環境条件について考察した結果を踏まえ各パラメータを改良したところ， $R^2=0.86$ となり過小傾向も解消された。

- (2) 改良値を用いて流動・低次生産モデルにより2005年1年間の計算を行った結果，表層部を中心に栄養塩変動の季節変動傾向，植物プランクトン量の再現性が向上し，基礎生産量の過小傾向も縮減された。
- (3) 計算結果は観測値に比較して，ごく沿岸で栄養塩とchl.aが低い傾向，春季以降の有光層下での栄養塩が過剰である等の課題が残り，動物プランクトンによる摂餌量や栄養塩の境界値等を是正する必要があると考えられた。

なお，本研究の一部は水産庁委託費「広域ネットワーク生態系モデル開発調査」および(独法)港湾空港技術研究所，水産工学研究所ならびに茨城県水産試験場の共同研究「砕波帯環境と水産生物動態に関する共同研究」の成果の一環である。また，衛星画像のデータは「宇宙航空研究開発機構 (JAXA/東海大学 (TSIC/TRIC))」から提供されたものである。

参考文献

- 足立久美子・中山哲厳・齋藤 肇 (2007)：鹿島灘海岸における長期モニタリングからみた栄養塩および植物プランクトン変動，海工論文集，第54巻，pp. 1156-1160。
- 足立久美子・中山哲厳 (2009)：開放性沿岸域における基礎生産を制限する環境諸要因について，海工論文集，第56巻，pp. 1131-1135。
- 新井雅之・中山哲厳・足立久美子・齋藤 肇・奥西 武・八木 宏 (2006)：鹿島灘・九十九里浜沿岸での一次生産に及ぼす利根川・那珂川の影響について，海工論文集，第53巻，pp. 1101-1105。
- 新井雅之・中山哲厳・足立久美子・齋藤 肇・奥西 武 (2007)：黒潮・親潮統流の影響が強い開放性沿岸域での一次生産に及ぼす河川水の影響，海工論文集，第54巻，pp. 1176-1180。
- 小松幸生・渡邊朝生・廣江 豊 (2004)：中央ブロック低次生態系予測モデルの開発，黒潮の資源海洋研究，第5号，pp. 5-28。
- 中田喜三郎 (1993)：沿岸生態系モデル，環境流体汚染，森北出版 (株)，pp. 165-231。
- 中山哲厳・齋藤 肇・新井雅之・足立久美子・奥西 武・八木 宏 (2005)：鹿島灘北部海域の一次生産に及ぼす那珂川の影響，海工論文集，第52巻，pp. 1051-1055。
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor (1987)：A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, three-Dimensional Coastal ocean Models, edited by N. Heaps, American Geophysical Union, pp. 1-16。
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamana and N. Sugihara (1995)：An ecological-physical coupled model applied to station Papa, Journal of Oceanography, Vol. 51, pp. 635-664。
- Kishi, M., H. Motono, M. Kashiwai and A. Tsuda (2001)：An ecological-physical coupled model with ontogenetic vertical migration of zooplankton in the northwestern Pacific, Journal of Oceanography, Vol. 57, pp. 499-507。